

Überlegungen zur Optimierung eines integrierten Energiesystems

In den vergangenen zwei Jahren hat sich im Rahmen des Projektes „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS)¹ eine interdisziplinäre Arbeitsgruppe intensiv mit der Frage beschäftigt, wie ein kostenoptimierter Umbau unseres Energiesystems erfolgen kann, mit dem zugleich die politisch gesetzten Klimaschutzziele erreicht werden und bei dem eine hohe Versorgungssicherheit gewährleistet wird. Die Ergebnisse der Arbeiten wurden in einer Stellungnahme² und einem Analysepapier³ zusammengefasst.

Im Fokus der Untersuchungen stand dabei eine Betrachtung des gesamten Energiesystems unter Einbeziehung aller Verbrauchssektoren und aller Energieträger; dabei wurden Fragen der Sektorkopplung ebenso diskutiert wie unterschiedliche Möglichkeiten volkswirtschaftlicher Instrumente, um eine übergreifende und zugleich möglichst technologieoffene Transformation des Energiesystems zu bewirken. Nachfolgend sind einige zentrale Ergebnisse zusammengefasst.

Die deutschen Klimaschutzziele erfordern einen äußerst ambitionierten Umbau des Energieversorgungssystems in wenigen Jahrzehnten. Lösungswege dafür werden nur bei Anwendung einer systemischen Herangehensweise mit einer integrierten

ganzheitlichen Betrachtung des Energiesystems und seiner zukünftigen Entwicklung sichtbar. In den Sektoren Verkehr, Wärme für Gebäude und Wärme für Industrieprozesse können die im Klimaschutzplan festgelegten Ziele nur erreicht werden, wenn eine weitgehende Kopplung mit der Stromerzeugung stattfindet. Zugleich ist eine wesentlich weitergehende Nutzung von nicht planbaren, volatilen erneuerbaren Energien wie Sonne und Wind nur denkbar mit neuen Stromanwendungen, die zuschaltbare Lasten bereitstellen.

Es gibt verschiedene Optionen der Sektorkopplung:

- 1) direkte Stromnutzung in den Sektoren Mobilität und Wärme
- 2) Erzeugung von Wasserstoff mit
 - a) direkter Nutzung als Endenergie
 - b) Weiterkonversion in unterschiedliche Kohlenwasserstoffe zur Verwendung als Chemierohstoffe sowie Brenn- und Kraftstoffe

Eine Analyse möglicher Systementwicklungen auf Basis dieser verschiedenen Sektorkopplungsoptionen führt zu einigen robusten Erkenntnissen hinsichtlich der Systementwicklung:



Fraunhofer ISE

Prof. Dr. Hans-Martin Henning
hans-martin.henning@ise.fraunhofer.de

KIT

Prof. Dr. Eberhard Umbach (emer.)
eberhard.umbach@kit.edu

1 Das durch das BMBF geförderte Projekt „Energiesysteme der Zukunft“ ESYS bündelt Expertise aus der Energieforschung in Deutschland unter dem Dach der Wissenschaftsakademien. Mehr über ESYS im Internet ► <https://energiesysteme-zukunft.de/>

2 „Sektorkopplung – Optionen für die nächste Phase der Energiewende“. Gemeinsame Veröffentlichung von: Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und Union der deutschen Akademien der Wissenschaften. Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft. ISBN: 978-3-8047-3672-6

3 Ausfelder et al. „Sektorkopplung – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems“. Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft. ISBN: 978-3-9817048-9-1



Abbildung 1

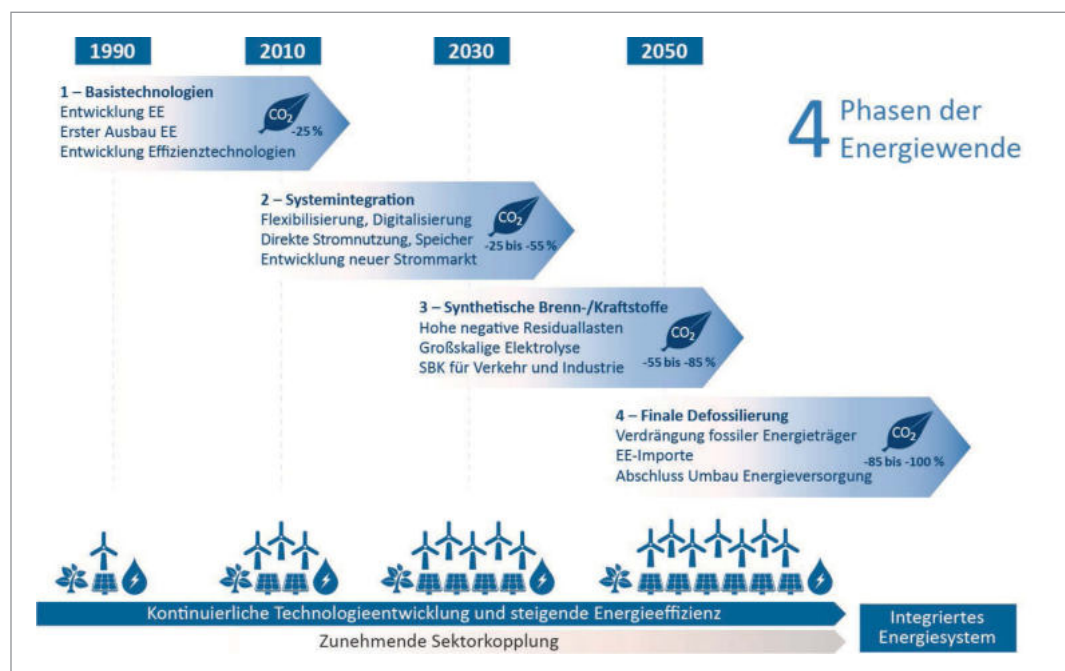
Entwicklung des Strombedarfs bei einer Reduktion energiebedingter CO₂-Emissionen um jeweils 85%. Dabei wird unterschieden nach Strombedarf für originäre Stromanwendung und für Stromanwendungen bei Wärme und Verkehr (Sektorkopplung).
 a) freie Optimierung
 b) Modellrechnung mit verschiedenen Annahmen, die eine Erreichung der Reduktionsziele wesentlich erleichtern

- Ein **starker Zubau an Anlagen** zur Stromerzeugung aus Sonne und Wind ist unabdingbar, um den insbesondere durch Sektorkopplung aller Voraussicht nach stark steigenden Strombedarf zu decken (► *Abbildung 1*). Sowohl gesellschaftliche Akzeptanzgründe als auch Aspekte der Flächennutzung und des Naturschutzes legen jedoch Systementwicklungen nahe, die diesen Ausbau so gering wie möglich halten.
- **Verbrauchsreduktionen** helfen deutlich bei der Erreichung der Klimaschutzziele, wenn man mit geringeren Mengen an erneuerbaren Energieanlagen auskommen möchte. Sie sind erreichbar durch geändertes Nutzerverhalten oder eine höhere Effizienz auf der Nutzungsseite wie im Fall der energetischen Sanierung von Gebäuden oder durch effizientere Techniken bei der Stromnutzung, etwa LED-Beleuchtungssysteme.
- Auch eine verstärkte Nutzung des gesamten Spektrums erneuerbarer Energien wie **Solarthermie, Geothermie und Biomasse** trägt dazu bei, den notwendigen Ausbau an Wind- und Photovoltaikanlagen zu begrenzen.
- Eine **direkte Nutzung von Strom** sollte überall dort erfolgen, wo diese mit vergleichsweise kleinem Aufwand möglich ist. Dafür spricht eine höhere Effizienz der Wandlungsketten, die mit geringeren Mengen notwendiger Anlagen erneuerbarer Energien und geringeren systemischen Kosten korrespondieren. Dies betrifft insbesondere
 - Wärmepumpen im Bereich der Wärmeversorgung von Gebäuden
 - direkte Nutzung von Strom für industrielle Prozesse
 - Elektrofahrzeuge mit Batteriespeichern
- Die **Erzeugung von Wasserstoff** auf Basis von Elektrolyse mit erneuerbarem Strom ist ab einem gewissen Ausbaugrad der erneuerbaren Energien sinnvoll, um Strom zu nutzen, der ansonsten verworfen werden müsste. Die Auslastung von Elektrolyseanlagen kann dadurch erhöht werden, dass diese auch Strom aus Kurzzeitspeichern wie Pumpspeicherkraftwerken oder Batterien verwenden.
- Für die **Nutzung von Wasserstoff** im Energiesystem gibt es eine Vielzahl von Optionen:
 - direkte Nutzung in industriellen Prozessen, zum Beispiel der Stahlherstellung
 - Nutzung als Kraftstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen
 - Rückverstromung in Brennstoffzellen oder Gasturbinen
 - Weiterkonversion in flüssige oder gasförmige kohlenwasserstoffbasierte Brenn- und Kraftstoffe. Dies erfordert, dass geeignete Kohlenstoffquellen zur Verfügung stehen, wie zum Beispiel CO₂ aus Abgasen von Kraftwerken, die mit fossilen oder biogenen Brennstoffen betrieben werden.

Aus heutiger Sicht können alle denkbaren Optionen für die Anwendung in Deutschland oder als Exporttechnologie für die Anwendung in anderen Regionen eine Rolle spielen und sollten dementsprechend in der Weiterentwicklung unterstützt werden.

- Trotz des Ausbaus erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung einschließlich der Installation von Kurzzeitspeichern und intelligentem Lastmanagement ist ein **zweiter Kraftwerkspark**

Abbildung 2
Vier Phasen der Energiewende



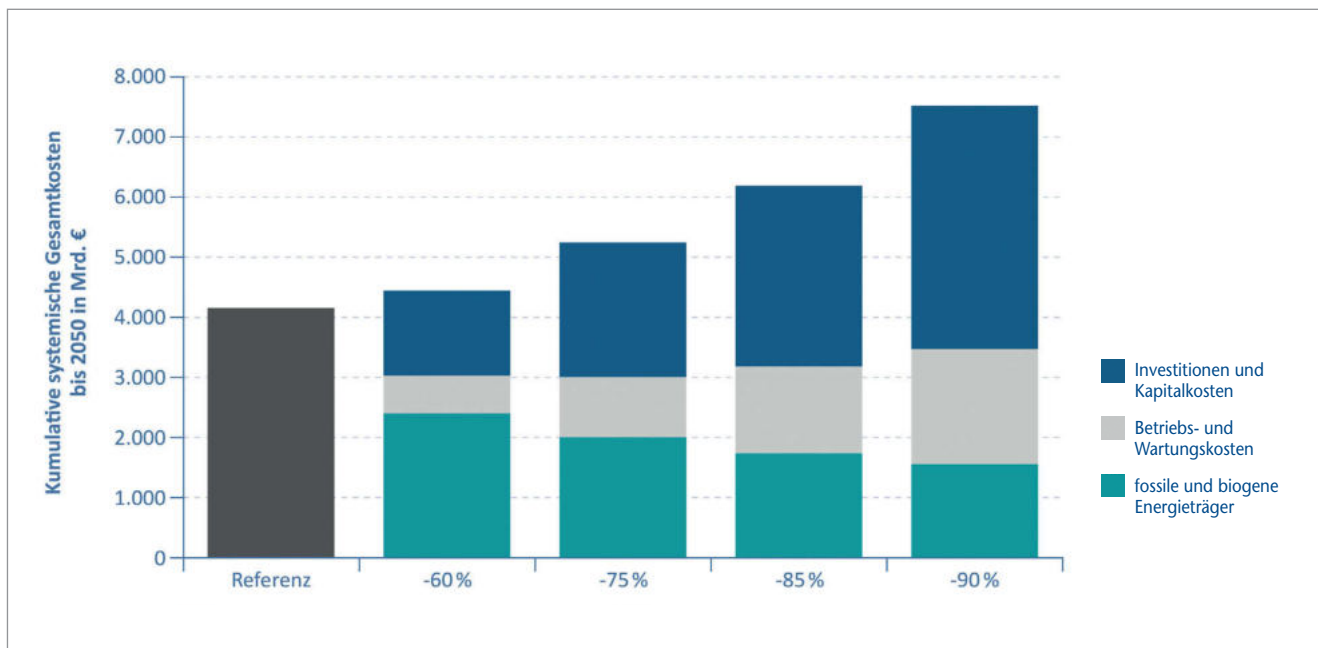


Abbildung 3

Kumulative systemische Gesamtkosten bis zum Jahr 2050. Die einzelnen Systementwicklungen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer CO₂-Emissionsreduktionsziele. Zum Vergleich links eine Referenzentwicklung, bei der die Klimaschutzziele weit verfehlt werden.

notwendig, um eine Versorgungssicherheit zu allen Zeiten – also auch in Phasen sogenannter Dunkelflauten – zu gewährleisten. Dafür ist eine Gesamtleistung notwendig, die in ähnlicher Größenordnung liegt wie die Leistung heutiger konventioneller Kraftwerke.

- Die Analyse der möglichen Transformationspfade legt eine **Entwicklung der Energiewende in vier Hauptphasen** nahe, die jeweils durch wesentliche Strukturmerkmale geprägt sind (► *Abbildung 2*):

- 1) Die erste, im Wesentlichen abgeschlossene Phase war durch die Entwicklung der Basistechnologien sowie einen starken Zubau an Anlagen erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung geprägt.
- 2) Nun folgt eine Phase der umfassenden Systemintegration, in der die Sektorkopplung eine maßgebliche Rolle spielt.
- 3) Es folgt eine dritte Phase, die von einem großskaligen Ausbau von Anlagen zur Herstellung und Nutzung von Wasserstoff geprägt ist.
- 4) Aus heutiger Sicht ist eine vierte Phase, charakterisiert durch die vollständige Verdrängung fossiler Energieträger, für Deutschland nur sinnvoll erreichbar durch Energieträger oder Strom, die in sonnen- und windreichen Zonen hergestellt werden.

Kostenbetrachtung

Die Energiewende ist kein Selbstläufer, und sie führt in der Phase des Umbaus zu beträchtlichen Mehrkosten im Vergleich zu einem Versorgungssystem, das auch längerfristig überwiegend auf der Nutzung fossiler Energien basiert. Bei aller Unsicherheit, die naturgemäß bei derartig umfänglichen und weitreichenden Entwicklungen gegeben ist, legen unsere Untersuchungen nahe, dass die summarischen Mehrkosten für den Zeitraum bis 2050 je nach Höhe des CO₂-Reduktionsziels (70 bis 85 Prozent) im Bereich von 1.000 bis 2.000 Milliarden Euro liegen können (► *Abbildung 3*). Dies entspricht im Mittel der nächsten 33 Jahre einem jährlichen Betrag von 30 bis 60 Milliarden Euro und somit rund ein bis zwei Prozent des deutschen Bruttoinlandsprodukts des Jahres 2016. Wir halten es für notwendig, solche Zahlen zu nennen, halten es zugleich aber für wichtig, diese im Kontext der Dimension des Projekts Energiewende einzuordnen:

- Ein erheblicher Anteil der genannten Mehrkosten sind **Investitionen in den Umbau** der Energieversorgung auf allen Ebenen und in allen Verbrauchssektoren. Ist der Umbau im Wesentlichen abgeschlossen, reduzieren sich die Investitionen auf Ersatzbeschaffungen, wie sie auch heute erfolgen.
- Die Energiewende ist ein **gesellschaftliches Großprojekt**, das einer Priorisierung von Zielen folgt – nämlich der Erreichung von Emissionsreduktionen klimaschädlicher Spurengase bei unveränderter Versorgungssicherheit zu möglichst

geringen Mehrkosten. Ein vergleichbares gesellschaftliches Großprojekt Deutschlands war die Wiedervereinigung.

- Die angegebenen Werte sind **gesamtsystemische Mehrkosten**. Darin sind weder externe Kosten noch volkswirtschaftliche Effekte wie Schaffung **lokaler Wertschöpfung und Beschäftigungseffekte** berücksichtigt. Auch diese beiden Aspekte sind von großer Bedeutung, sprengen aber den Rahmen unserer Untersuchungen und wären es wert, in einer eigenen Arbeitsgruppe untersucht zu werden.
- Neben einer Nennung der Kosten ist es gleichermaßen wichtig, die **Chancen** zu sehen und zu nutzen, die das Großprojekt Energiewende eröffnet. Gerade für ein Hochtechnologieland wie Deutschland, dessen Wirtschaft stark auf **Technologieexport** baut, scheint es uns von essenzieller Bedeutung, führend an der Entwicklung von Technologien zu partizipieren, denen aller Voraussicht nach weltweit eine wachsende Bedeutung zukommen wird.

Hauptinstrument CO₂-Bepreisung

Wie könnte der eingangs formulierte Anspruch einer ganzheitlichen, integrierten Betrachtung des gesamten Energiesystems in einen widerspruchsfreien Handlungsrahmen überführt werden? Aus der Sicht der ESYS-Arbeitsgruppe ist ein wirksamer, übergreifender CO₂-Preis die zentrale Anforderung, um die Klimaschutzziele kostenoptimiert zu erreichen. *Wirksam* bedeutet dabei, Mindestgrenzen für den Preis von CO₂-Emissionen festzulegen. Das geschieht heute schon in einigen Ländern wie beispielsweise Großbritannien. *Übergreifend* wird der Preis, wenn er alle Sektoren und Energieträger einschließt.

Allerdings ist wenig gewonnen, wenn ein hohes Preissignal nur in Deutschland besteht und dazu führt, dass energieintensive Prozesse abwandern. Insofern sollte eine internationale, zumindest europäische Einbettung angestrebt werden. Eine Ausweitung des europäischen Handelssystems für Emissionszertifikate auf alle Sektoren wäre eine wünschenswerte Option. Sie ließe sich mit überschaubarem Transaktionsaufwand realisieren, wenn sie bei den primären Anbietern fossiler Energieträger ansetzt.

Eine nationale CO₂-Steuer, die zugleich andere Steuern auf Energieträger ablöst, wäre eine zweite Option, die entweder ergänzend oder aber alternativ – falls eine europäische Lösung zur Ausweitung des EU-ETS nicht zeitnah gelingt – umgesetzt werden könnte.

Die Etablierung eines Systems, das ein einheitliches Preissignal für CO₂-Emissionen schafft, scheint uns das wichtigste übergreifende Einzelelement für den zukünftigen Marktrahmen zu sein, da es technologieoffen einheitlich auf das Energiesystem als Ganzes wirkt.

Weitere Instrumente

In der energiewirtschaftlichen Praxis werden zusätzlich zu einem einheitlichen CO₂-Preis ergänzende Instrumente benötigt, um Marktversagen zu korrigieren und gegebenenfalls Lock-in-Effekte zu vermeiden. Marktversagen kann beispielsweise durch Informationsdefizite oder durch Differenzen zwischen langfristigem volkswirtschaftlichem Nutzen und kurzfristigen Amortisationserwartungen von Unternehmen und Haushalten auftreten. Zudem können ergänzende Instrumente neben den CO₂-Emissionen auch andere externe Kosten (wie lokale Umweltfolgen oder weitere Schadstoffemissionen) berücksichtigen. Zu den unterstützenden Maßnahmen zählen etwa Technologieförderung, Infrastrukturentwicklung oder ordnungsrechtliche Vorgaben (zum Beispiel Grenzwerte, Harmonisierung technischer Standards). Zusätzliche Instrumente sollten daher unter einem Prüfvorbehalt stehen: Notwendigkeit, Wirksamkeit und Kosten-Nutzen-Verhältnis sollten einer laufenden Evaluierung unterliegen, und die Instrumente sollten offen für Nachjustierungen sein.